

К. ф.-м. н. М. В. ДМИТРИЕВ, к. т. н. И. Н. ЕРИМИЧОЙ,
к. т. н. Л. И. ПАНОВ, Е. Л. ПАНОВА

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: panov.leonid@gmail.com

Дата поступления в редакцию
22.04 2008 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕКРИСТАЛЛИЗУЮЩЕЙСЯ МОНОАРМИРОВАННОЙ ПОЛИМАТРИЧНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ

Предложен комплексный метод прогнозирования диэлектрических параметров стеклокерамики с одним армирующим и двумя стеклянными компонентами при разном их соотношении.

Стеклокерамические композиционные материалы (СКМ) успешно заменяют радиокерамику в изделиях разного назначения [1, 2], выгодно конкурируя с ней и обеспечивая высокую прибыль за счет снижения себестоимости. Параметры СКМ можно изменять в широких пределах, варьируя материалы, их количество, соотношение компонентов и режимы технологии. СКМ обладают экономическими, техническими и технологическими преимуществами благодаря использованию энергосберегающих, наукоемких технологий.

Конкурентоспособность многих изделий из СКМ обеспечивается композитами с оптимальными свойствами и сменяемыми прогрессивными технологиями при постоянном улучшении свойств, снижении себестоимости и ускорении процесса разработки.

Препятствием на этом пути является большая длительность поиска материала с оптимальными свойствами, если ограничиваться только экспериментами. Это обусловлено необходимостью придания материалу свойств, которые характеризуются десятком параметров при неоднозначности влияния на них многих варьируемых факторов:

- материалов, их чистоты, количества и соотношения окислов стеклянного компонента;
- параметров стеклянного компонента;
- материала, чистоты, количества и свойств функционального наполнителя;
- соотношения компонентов СКМ;
- режимов технологических операций: степени измельчения компонентов, температурно-временного профиля спекания и др.

В публикациях о композитах, в основном, приведены конечные результаты разработки. В них практически отсутствуют сведения о влиянии многих факторов на характеристики материала. Это обуславливает необходимость проведения большого количества экспериментов в процессе разработки.

Так, для четырех случаев варьирования каждого фактора и при их количестве, равном десяти, требу-

ется проведение $4^{10}=1048576$ опытов, позволяющих выбрать оптимальный вариант изготовления изделия.

Сократить объемы экспериментов можно путем внедрения теоретических методов исследования в практику инженерных расчетов, которые позволят оперативно просчитывать различные варианты создания материала. Эффект может быть достигнут как при разработке новых, так и при совершенствовании существующих СКМ.

Аналитические методы исследования раскрывают количественные связи между составом, режимами технологии, структурой и достигаемыми свойствами материала. Они относятся к числу сложных, многопараметрических и многофакторных методов. Поэтому целесообразно сначала создавать менее сложные методы, каждый из которых устанавливает индивидуальную количественную связь части свойств композита с частью варьируемых факторов.

Метод аналитического прогнозирования диэлектрических параметров СКМ (далее — **D-параметров**) для разных соотношений его компонентов представляет собой один из таких методов.

В работах [3—7] подобная задача была решена для СКМ с простейшей структурой, полученной при спекании двух исходных материалов — стекла и наполнителя.

Возможность влияния на свойства СКМ появляется при введении в его состав дополнительного стекла. При подходящих свойствах этого стекла можно получить такие преимущества как:

- ускорение разработки стеклофазы — обычно наиболее сложной, длительной и дорогостоящей части разработки СКМ;
- снижение температуры спекания за счет более низкой температуры образования жидкой фазы дополнительного стекла;
- расширение диапазона применения СКМ;
- улучшение его свойств и др.

С целью продолжения исследований, начатых в [3—7], была поставлена задача создания простого способа прогнозирования D-параметров более сложного композита.

Решение этой задачи осуществлялось комплексным методом, сочетающим экспериментальные и теоретические исследования. Первичный, измерительный, эксперимент был выполнен на изготовленных образцах СКМ. Вторичный, вычислительный,

эксперимент позволил получить в количественном выражении новые сведения об СКМ, полезные для оптимизации его свойств.

Теоретические поиски достоверной связи свойств композитов со свойствами их компонентов активно, но безуспешно предпринимались на протяжении всего двадцатого столетия. Эти поиски отражены в десятках публикаций, обзор которых содержится в [8, 9]. Проявленный интерес обусловлен широким применением композиционных материалов во многих областях техники. Полученные формулы по разным причинам не обеспечивают достаточно точного совпадения результатов расчета с опытными данными.

В работах [5—7] на примере D -параметров показано, что такого совпадения можно достичь, если в расчетах учесть изменения количественных характеристик компонентов, вносимые операциями изготовления. Кроме того, в [5] была экспериментально доказана применимость для таких расчетов простой формулы, отражающей логарифмический закон смешивания компонентов, опубликованной в работе [10] в 1931 г. Для D -параметров она имеет вид

$$\ln(D) = \sum_{i=2}^k y_i D_i, \quad (1)$$

где D, D_i — относительная диэлектрическая проницаемость ϵ (или тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, или удельное объемное электросопротивление ρ) композита и i -го компонента, соответственно;

y_i — объемная доля i -го компонента;
 k — количество компонентов.

D -параметры являются эффективными показателями свойств гетерофазного материала.

В данной работе для прогнозирования использована полученная в [11] степенная зависимость D -параметров композита от D -параметров компонентов. Ее справедливость подтверждена экспериментами на многокомпонентных СКМ и результатами контрольных расчетов по логарифмической формуле (1).

Для многокомпонентного композита степенная формула имеет вид

$$D^n = \sum_{i=2}^k y_i D_i^n, \quad (2)$$

где n — показатель степени, равный 10^{-4} практически для любых встречаемых величин ϵ , $\operatorname{tg}\delta$ и ρ [11].

Объемные доли i -х компонентов, согласно [12, с. 33], определяются по формуле:

$$y_i = \frac{m_i / \rho_i}{\sum_{i=1}^k m_i / \rho_i}, \quad (3)$$

где m_i, ρ_i — массовая доля и плотность i -го компонента k -компонентного композита, соответственно.

В настоящей работе для исследований выбран гетерофазный изотропный полиматричный моноармированный СКМ. Его синтез осуществляется методом порошковой металлургии жидкофазным спеканием мелкодисперсного композиционного и гомогенизированного порошка из частиц стекла и функ-

ционального наполнителя. Структура его определяется тремя исходными материалами: наполнителем и двумя стеклами с различными свойствами, образующими стеклянную матрицу. Матрица представляет собой двухкомпонентный стеклянный композит в составе стеклокерамического композиционного материала. Распределенный в стекле тугоплавкий оксидный кристаллический армирующий наполнитель улучшает свойства СКМ и обеспечивает его формоустойчивость при спекании.

Исследуемый СКМ не содержит пор и образующейся при спекании новой кристаллической фазы, которые могли бы негативно повлиять на величины D -параметров.

Как установлено в работах [6, 7], даже малая доля пор ощутимо ухудшает параметры материала $\operatorname{tg}\delta$ и ρ , поскольку эффективные параметры пор $\operatorname{tg}\delta_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{п}}$ на несколько порядков хуже, чем параметры компонентов СКМ. Кроме того, поры увеличивают разброс линейной усадки при спекании. Это ухудшает воспроизводимость размеров изделий и приводит к необходимости применения механообработки. Отсутствие пор обеспечивается жидкофазным спеканием СКМ при определенной температуре.

Кристаллическая фаза может ухудшить D -параметры, поскольку:

- на ее формирование требуется дополнительный расход стекла, свойства которого хуже свойств наполнителя;
- свойства остаточного стекла могут стать хуже, чем у исходного.

В настоящей работе была исключена необходимость изготовления образцов трехкомпонентного СКМ. Вместо этого исходные данные для вторичного эксперимента обеспечены результатами эксперимента на более простых двухкомпонентных образцах СКМ-1 (стекло 1 + наполнитель) и СКМ-2 (стекло 2 + наполнитель).

Первичный эксперимент

В данной работе не ставилась задача создания специально разработанного СКМ, и выбор материалов компонентов был сделан только для решения основной задачи.

В качестве стекла 1 выбрано выпускаемое промышленностью некристаллизующееся электровакуумное кальцевоалюмооборатное стекло С51-1 следующего состава (мас. %): SiO_2 — 14; Al_2O_3 — 31; CaO — 20; B_2O_3 — 31; SrO — 4 [13].

В качестве стекла 2 выбрано кристаллизующееся свинцовоборосиликатное стекло следующего состава (мас. %): SiO_2 — 38; PbO — 19; B_2O_3 — 13; Al_2O_3 — 12; ZnO — 5; MgO — 6; CaO — 7 [14].

В качестве наполнителя выбран глинозем ГН-1 (ГОСТ 6912-87 ТУ), содержащий 95% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Методика изготовления образцов СКМ-1 и СКМ-2 из перечисленных материалов идентична приведенной в работе [5]. Все образцы были изготовлены при одинаковых режимах технологии:

- удельная поверхность порошков каждого стекла — $850 \text{ м}^2/\text{кг}$, порошка наполнителя — $650 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- отношение массовых долей стекла и наполнителя $m_{\text{с}}:m_{\text{н}}=0,4:0,6$;

— одновременное спекание спрессованных гомогенизированных композиций в электропечи при температуре 900°C проводилось в течение 10 минут, что на порядок выше времени спекания оснований одноваттных непроволочных резисторов [2] и конденсаторов емкостью ≈ 1 пФ. Это дает возможность изготовления более крупных изделий.

Благодаря выбранному режиму спекания была исключена кристаллизация стекла 2, предкристаллизационный период которого $\tau_n \geq 10$ мин. Отсутствие кристаллической фазы подтверждено рентгено-фазовым анализом.

Определение экспериментальных значений D -параметров в СКМ-1 и в СКМ-2 осуществлялось при температуре около 25°C. Измерения выполнены в соответствии с ОСТ 110303-86 с соблюдением требуемых размеров и количества образцов. Для измерения $\text{tg} \delta$ и электрической емкости на частоте 1 МГц использовался измеритель Е7-12, для измерения электросопротивления постоянному току — тераомметр Е6-13.

Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты первичного эксперимента

Композит/ компонент	D -параметры			Плотность ρ , г/см ³
	ϵ	$\text{tg} \delta$	ρ , Ом·м	
СКМ-1	8,82	0,00042	$3,0 \cdot 10^{11}$	—
СКМ-2	8,17	0,00015	$1,2 \cdot 10^{12}$	—
Наполнитель	11 [1]	10^{-5} [2]	10^{13} [3]	3,7 [1]
Стекло 1	6,95	0,023	$6,67 \cdot 10^9$	2,65 [1]
Стекло 2	5,72	0,0041	$9,5 \cdot 10^{10}$	2,97

D -параметры выбранного наполнителя взяты из работ [1—3]. Они были получены при тех же режимах технологии, что и в данной работе, и занесены в табл. 1 в качестве исходных данных для вычислительного эксперимента.

Значения плотности измельченных компонентов определялись пикнометрически с применением ксилола.

Результатами эксперимента, согласно формулам (2) и (3), должны быть значения параметров D_i и объемных долей компонентов СКМ y_i , соответствующих произвольно задаваемым величинам m_i .

В соответствии с формулой (3), значения y_i определяются с помощью выражений

$$y_{c1} = \frac{\frac{m_{c1}}{p_{c1}}}{\frac{m_{c1}}{p_{c1}} + \frac{m_{c2}}{p_{c2}} + \frac{m_i}{p_i}}; \quad (4)$$

$$y_{c2} = \frac{\frac{m_{c2}}{p_{c2}}}{\frac{m_{c1}}{p_{c1}} + \frac{m_{c2}}{p_{c2}} + \frac{m_i}{p_i}}; \quad (5)$$

$$y_n = \frac{\frac{m_n}{p_n}}{\frac{m_{c1}}{p_{c1}} + \frac{m_{c2}}{p_{c2}} + \frac{m_n}{p_n}}, \quad (6)$$

где p_{c1} , p_{c2} , p_n — плотность стекла 1, стекла 2 и наполнителя, соответственно;
— массовые доли тех же компонентов.

m_{c1} , m_{c2} , m_n —

Вычисленные по формулам (4)—(6) значения y_i для разных величин m_i сведены в табл. 2 и также служат исходными данными для вторичного эксперимента.

Для двухкомпонентных СКМ-1 и СКМ-2 формула (2) приобретает вид

$$D_{\Sigma 1}^{10^{-4}} = y_{c1} D_{c1}^{10^{-4}} + y_n D_n^{10^{-4}}; \quad (7)$$

$$D_{\Sigma 2}^{10^{-4}} = y_{c2} D_{c2}^{10^{-4}} + y_n D_n^{10^{-4}}, \quad (8)$$

откуда искомые параметры стекол можно определить по формулам:

$$D_{c1}^{10^{-4}} = \frac{D_{\Sigma 1}^{10^{-4}} - y_n D_n^{10^{-4}}}{y_{c1}}; \quad (9)$$

$$D_{c2}^{10^{-4}} = \frac{D_{\Sigma 2}^{10^{-4}} - y_n D_n^{10^{-4}}}{y_{c2}}. \quad (10)$$

Параметры стекол D_{c1} и D_{c2} , вычисленные на примере СКМ с соотношением $m_c:m_n=0,4:0,6$, при использовании экспериментальных данных табл. 1, служат достаточными сведениями для выполнения вторичного вычислительного эксперимента.

Вторичный эксперимент

Вычисления прогнозируемых величин D_i СКМ выполнены с использованием экспериментальных данных из табл. 1, расчетных данных о величинах объемных долей компонентов y_i из табл. 2, а также формулы:

$$D_i^{10^{-4}} = y_{c1i} D_{c1}^{10^{-4}} + y_{c2i} D_{c2}^{10^{-4}} + y_{ii} D_i^{10^{-4}}, \quad (11)$$

полученной из (2) для выбранного СКМ.

Результаты этих вычислений сведены в табл. 2. Из них видно, что варьирование соотношения компонентов приводит к ощутимым изменениям D -параметров композитов, изготавливаемых в одинаковых условиях. Эти изменения должны быть тем больше, чем больше отличаются друг от друга параметры компонентов.

Прогнозирование D -параметров было частично повторено с применением логарифмической формулы (1). Результаты с большой точностью совпали с приведенными в табл. 2, когда вычисленные значения $\ln D$ и $D^{10^{-4}}$ при последующих расчетах задавались не менее, чем восемью значащими цифрами.

Диапазон прогнозируемых D -параметров может быть расширен за счет уменьшения массовой доли наполнителя. Это существенно увеличит объем получа-

Прогнозируемые D -параметры СКМ (результаты вторичного эксперимента)

Массовые доли компонентов		Объемные доли компонентов			D -параметры		
m_{c1}	m_{c2}	y_{c1}	y_{c2}	y_n	ε	$\operatorname{tg}\delta$	ρ , Ом·м
$m_c:m_n=0,4:0,6$							
0	0,40	0	0,454	0,546	8,17	0,00015	$1,2 \cdot 10^{12}$
0,05	0,35	0,063	0,394	0,543	8,26	0,00017	$1,0 \cdot 10^{12}$
0,10	0,30	0,125	0,336	0,539	8,34	0,00020	$8,7 \cdot 10^{11}$
0,15	0,25	0,187	0,278	0,535	8,42	0,00023	$7,2 \cdot 10^{11}$
0,20	0,20	0,247	0,221	0,532	8,50	0,00026	$6,1 \cdot 10^{11}$
0,25	0,15	0,307	0,165	0,528	8,58	0,00029	$5,1 \cdot 10^{11}$
0,30	0,10	0,366	0,109	0,525	8,66	0,00033	$4,3 \cdot 10^{11}$
0,35	0,05	0,425	0,054	0,521	8,74	0,00037	$3,6 \cdot 10^{11}$
0,40	0	0,482	0	0,518	8,82	0,00042	$3,0 \cdot 10^{11}$
$m_c:m_n=0,45:0,55$							
0	0,45	0	0,505	0,495	7,91	0,00021	$9,5 \cdot 10^{11}$
0,05	0,40	0,062	0,446	0,492	7,99	0,00024	$8,0 \cdot 10^{11}$
0,10	0,35	0,124	0,387	0,489	8,07	0,00027	$6,7 \cdot 10^{11}$
0,15	0,30	0,185	0,330	0,485	8,14	0,00030	$5,6 \cdot 10^{11}$
0,20	0,25	0,245	0,273	0,482	8,22	0,00035	$4,7 \cdot 10^{11}$
0,25	0,20	0,304	0,217	0,479	8,30	0,00039	$3,9 \cdot 10^{11}$
0,30	0,15	0,362	0,162	0,476	8,38	0,00044	$3,3 \cdot 10^{11}$
0,35	0,10	0,420	0,107	0,473	8,46	0,00049	$2,8 \cdot 10^{11}$
0,40	0,05	0,477	0,053	0,470	8,54	0,00055	$2,5 \cdot 10^{11}$
0,45	0	0,533	0	0,467	8,61	0,00062	$2,0 \cdot 10^{11}$
$m_c:m_n=0,35:0,65$							
0	0,35	0	0,401	0,599	8,46	0,00011	$1,6 \cdot 10^{12}$
0,05	0,30	0,064	0,342	0,594	8,54	0,00013	$1,3 \cdot 10^{12}$
0,10	0,25	0,127	0,283	0,590	8,62	0,00015	$1,1 \cdot 10^{12}$
0,15	0,20	0,189	0,225	0,586	8,71	0,00017	$9,1 \cdot 10^{11}$
0,20	0,15	0,250	0,168	0,582	8,79	0,00019	$7,6 \cdot 10^{11}$
0,25	0,10	0,311	0,111	0,578	8,87	0,00022	$6,4 \cdot 10^{11}$
0,30	0,05	0,369	0,058	0,573	8,94	0,00025	$5,3 \cdot 10^{11}$
0,35	0	0,429	0	0,571	9,03	0,00028	$4,5 \cdot 10^{11}$

емой информации, что расширит возможность выбора СКМ для конкретного или разных применений.

Выводы

Создан способ прогнозирования диэлектрических свойств трехкомпонентного СКМ для разных соотношений компонентов (2 стекла и наполнитель), сочетающий эксперимент и теоретические исследования. Результат прогнозирования — представляемые в количественном выражении сведения об СКМ — используется для оптимизации его свойств.

Преимущества способа состоят в том, что:

— для получения исходных данных для прогнозирования не требуется изготовления трехкомпонентного СКМ;

— первичный измерительный эксперимент выполняется на простых двухкомпонентных СКМ всего двух составов;

— в качестве теоретической базы используется

любая из двух простейших формул (1) или (2), что упрощает программу для вычислений;

— применяется относительно простая методика определения величин диэлектрических параметров компонентов, реализуемых в составе синтезированного СКМ.

Рассмотренный способ может быть полезен при разработке СКМ разного назначения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дмитриев М. В. Композиционная радиостеклокерамика // Труды Одесского политехнического университета. — 1999. — Вып. 2 (8). — С. 209—211.
2. Дмитриев М. В. Стеклокерамические основания резисторов // Труды Одесского политехнического университета. — 1999. — Вып. 1 (7). — С. 89—91.
3. Дмитриев М. В. Прогнозирование диэлектрических свойств композиционной стеклокерамики с кристаллизуемым стеклом для разных соотношений компонентов // Материалы электронной техники. — 2000. — № 3. — С. 35—37.

4. Дмитриев М. В. Диэлектрические свойства стеклокерамики для разных соотношений стекла, наполнителя и продукта их взаимодействия // Известия вузов. Электроника. — 2000. — № 6. — С. 11—14.

5. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрическую проницаемость стеклокерамики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1997. — № 4. — С. 34—39.

6. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрические потери в стеклокерамике // ТКЭА. — 1998. — № 1. — С. 39—43.

7. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на электросопротивление стеклокерамики // ТКЭА. — 1998. — № 2. — С. 43—47.

8. Привалко В. П., Новиков В. В., Яновский Ю. Г. Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов. — Киев: Наукова думка, 1991.

9. Дульнев Г. Н., Новиков В. В. Процессы переноса в неоднородных средах. — Л.: Энергоатомиздат, 1991.

10. Lichteneker K., Rother K. Die herleitung des logarithmischen mischungsgesetzes des allgemeinen prinzipien der stationaren stroumung // Physikalische Zeitschrift. — 1931. — Bd, N 6. — S. 255—267.

11. Дмитриев М. В. Степенная связь параметров композиционного материала и его компонентов // ТКЭА. — 2002. — № 4—5. — С. 58—61

12. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — Л.: Энергия, 1974.

13. Стандарт предприятия СТП ПАЩ.0.27.0.15.78.

14. А. с. 1782947 СССР. Стеклокерамический композиционный материал / Буран Л. В., Дмитриев М. В., Лемза В. Д., Тартаковская Л. Н. — 22.08 1992.

К. ф.-м. н. О. А. КУЛИНИЧ, д. ф.-м. н. В. А. СМЫНТЫНА,
к. ф.-м. н. М. А. ГЛАУБЕРМАН, к. ф.-м. н. Г. Г. ЧЕМЕРЕСЮК,
И. Р. ЯЦУНСКИЙ

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: yatsunskiy@gmail.com, eltech@elaninet.com

Дата поступления в редакцию
17.04 2008 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНЫХ ДЕФЕКТОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОКИСЛЕНИИ КРЕМНИЯ

Показано, каким образом дефекты исходного кремния влияют на структурные изменения поверхности и приповерхностной области в процессе высокотемпературного окисления.

По мнению ведущих производителей электронной техники, кремний будет оставаться основным материалом для производства элементной базы современной электроники еще как минимум сто лет [1]. При переходе от микронных и субмикронных элементов электронной техники к наноразмерным элементам существенно повышаются требования к структурному совершенству исходного полупроводникового материала и технологии изготовления изделий. Если в случае микронных размеров элементов в зоне пространственного заряда одного структурного дефекта располагалось до десятка элементов, то в случае наноразмерных элементов в зоне пространственного заряда дефекта располагаются десятки тысяч элементов, проводимость рабочих зон которых может быть инвертирована. Процент выхода годных элементов при этом существенно снижается. Установлено, что дефекты в исходном полупроводниковом материале влияют на процесс дефектообразования в изделии при проведении различных технологических операций, однако механизм этого влияния до конца изучен не был.

Целью представленной работы является изучение с помощью современных методов исследования механизма влияния исходных дефектов на распределе-

ние механических напряжений и деформаций в процессе дефектообразования при окислении кремниевых пластин.

Объектами изучения являлись пластины монокристаллического кремния КЭФ-4,5 (111) и КДБ-10 (100), выращенные методом Чохральского, с различным удельным сопротивлением, окисленные в атмосфере сухого кислорода при температуре 1150°C. Толщина пленок оксидов определялась по времени выращивания и эллипсометрическим методом и составляла от 1 до 1,5 мкм.

Для выявления дефектов на поверхности пластин кремния сначала для удаления оксида кремния производилась обработка поверхности плавиковой кислотой (HCl), далее производилась обработка кремниевых пластин химическими избирательными травителями Сиртля (поверхность 111) [2] и Сэкко (поверхность 100) [3] (скорость травления порядка 2—3 мкм/мин) с предварительной обработкой в составах Каро и перекисноаммиачном растворе [4]. Такая предварительная обработка позволяла за счет процессов дополнительного окисления повысить выявляющие свойства избирательных травителей (ИТ).

Изучение поверхности кремния после химической обработки проводилось различными методами.

Для электронной сканирующей микроскопии применяли микроскоп-анализатор Cam Scan-4D с системой энергетического дисперсионного анализатора «Link-860» и программой «Zaf». Чувствительность прибора составляла 0,01% по массе, диаметр пучка — от $5 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ м [5].